



УДК 621.438.082.2

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СМЕЩЕНИЯ СЕЧЕНИЯ ЛОПАТКИ В ОСЕВОМ НАПРАВЛЕНИИ НА ЗАПАС ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ И КПД СТУПЕНИ

### INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE DISPLACEMENT OF THE BLADE SECTION IN THE AXIAL DIRECTION ON THE GAS DYNAMIC STABILITY RESERVE AND THE EFFICIENTLY OF THE STAGE

**Кузнецова Юлия Андреевна**, студент каф. «Турбины и двигатели», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: juliayao@mail.ru, Тел.: +7(950)545-22-31

**Серков Сергей Александрович**, аспирант каф. «Турбины и двигатели», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: serkov.s.a@mail.ru, Тел.: +7(922)224-11-06

**Julia A. Kuznetsova**, student at Department "Turbines and Engines", Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: juliayao@mail.ru, Ph.: +7(950) 545-22-31

**Sergey A. Serkov**, Phd Student at Department "Turbines and Engines", Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: serkov.s.a@mail.ru Ph.: +7(922)224-11-06

**Аннотация:** В данной работе представлена оптимизация формы лопатки первой ступени осевого компрессора, при помощи осевого навала профильной части. Исследования течения в ступени осуществлялись в программном комплексе вычислительной газодинамики. По известным геометрическим данным построены профили лопаток, а также меридиональные обводы. Приведены рекомендации о применении осевого навала для первой ступени.

**Abstract:** In this work optimization of a shape of a shovel of the first step of the axial compressor, by means of a sweep of a profile part is presented. Research of the flow in the stage were carried out in the program complex of computational gas dynamics. According to known geometric data, blade profiles and meridional contours are constructed. Recommendations of application of an axial pile for the first step are provided.

**Ключевые слова:** осевой компрессор; осевой навал, уравнение радиального равновесия, закрутка потока, равновесие параметров по высоте ступени.

**Key words:** axial compressor; sweep; the equation of equilibrium; twisting of the flow; radial equilibrium of the parameters by the stage height.

На сегодняшний день, эффективным с точки зрения проектирования осевого компрессора, является применение трехмерно оптимизированных лопаток, для получения высоких значений КПД и оптимальных характеристик ОК [1]. Одним из способов трехмерного моделирования является осевой навал пера лопатки. Данный способ оптимизации формы лопатки дает возможность получить оптимальный участок осреднения потока, за предыдущим венцом который позволит размыть закомочные следы лопаток без снижения запаса устойчивости.

Размера осевого зазора оказывает влияние на размытие закомочных следов за лопатками, а также на изменение градиента давлений между спинкой и корытцем. Неоптимальный осевой зазор между венцами приводит к возникновению неравномерности поля скоростей за решеткой, а также к более нестационарному обтеканию следующего ряда лопаток.

Профилирование лопаток основано на использовании уравнений радиального равновесия потока в межлопаточных каналах, но так как в осевых зазорах потоку газа не сообщается энергия от лопаток и уравнение радиального равновесия в общем виде трансформируется в (1).

$$dc = \sigma m \frac{c_{1u}}{r} = \frac{2\pi \Delta S r drc_{1u}^2}{v_1 r} \quad (1)$$

где  $V_1$ -удельный объем в зазоре на радиусе  $r$ ;  
 $dC$ -центробежная сила;  $\sigma m$ -масса;  $\Delta S$ -ширина  
 осевого зазора;  $c_{1u}$ -окружная скорость

На поток действует остаточная закрутка после лопаточного венца и влияние перемешивания потока остается существенным. Указанная центробежная сила уравнивается силой, обусловленной разностью давлений на наружной и внутренней поверхности выделенных частиц потока. Отсюда следует, что при увеличении зазора между лопатками увеличивается осреднение потока. Для того чтобы избежать увеличения габаритов ОК и увеличить осевой зазор возможно применить для лопаточных венцов осевой навал.

Опираясь на мировой опыт проектирования лопаток ОК стоит сказать, что применение осевого навала может оказывать существенное влияние на аэродинамические характеристики ступени в рабочей точке, а также на границу устойчивой работы. Изгиб лопатки НА в осевом направлении в сторону выхода увеличивает КПД и  $\Delta K_u$ , а в сторону входа снижает эти параметры, что связано с изменением структуры течения в пристеночных слоях на поверхности лопаток [2].

Так же стоит отметить, что поток в ступени ОК является неуравновешенным в осевом и радиальном направлении. Неравномерность параметров в канале ведет к образованию вращающегося вихря, который образуется из-за не стационарности потока за лопаточными венцами. Уравнивание параметров потока возможно путем применение навала для улучшение требуемых параметров. Для повышения эффективности ступени следует проводить оптимизацию по снижению неравномерности осевой составляющей абсолютной скорости и статического давления на выходе из венца [3].

Поэтому следует рассмотреть осевой изгиб пера лопатки, для равномерного перераспределения потока и возможности сделать поток стабильным, тогда перемешивание потока будет минимальным на входе в следующий венец, а также в свою очередь увеличится расход воздуха вблизи меридиональных обводов, что положительно скажется на запасе ГДУ. Так в подтверждение вышесказанного, в исследовании [4] установлено, что применение осевого навала влияет в первую очередь на структуру потока и на структуру вторичных течений, это связано с перераспределением поля давлений.

В лопаточных машинах уменьшение потерь кинетической энергии в корне достигается при осевом навале лопаток против потока, а на периферии против потока, а также по потоку.

На основе анализа литературных источников можно сделать вывод о том, что необходимость применения навала оправдана повышением запаса устойчивости и КПД, а также возможным повышением эффективности проточной части осевого компрессора. Навал влияет на структуру потока и для получения высоких значений КПД,  $\Delta K_u$  и наименьших зон срыва, следует равномерно перераспределить поток и сделать его стабильным. По всем соображениям целесообразно применение осевого навала, для получения положительного эффекта при согласовании ступеней за счет более ламинарного обтекания лопаток.

Для новых лопаток ОК применен закон закрутки с постоянным распределением скорости  $C_a$  по высоте и переменной скоростью  $C_u$ , которая изменяется по закону (2) в диапазоне варьирования переменной  $m$  от -1 до 1. Данный закон определяет условие безвихревого течения, когда внутреннее трение между отдельными слоями газа минимально, что обеспечивает меньшие потери энергии и больший КПД ступени.

$$C_u = \left( \frac{r_{cp} \cdot (C_{1u,cp} + C_{2u,sp})}{2} \right) - \frac{U_{cp} \cdot (C_{1u,sp} + C_{2u,sp})}{2 \cdot U_i} \quad (2)$$

Где  $C_{1,2u}$ - окружная составляющая абсолютной скорости в среднем сечении;  $U_{cp}$ - окружная скорость на в среднем сечении;  $r$  - относительный радиус;  $U_i$ - окружная скорость на входе в ступень в расчетном сечении.

Для исследования влияния формы лопатки на поток необходимо рассчитать ступень компрессора с различными осевыми навалами РК и НА в сторону по направлению движения воздуха и в противоположенную сторону.

Для исследования использовали первую ступень ОК ГТК-10-4, так как она более высоконагружена и имеет низкий КПД относительно других ступеней в ОК (Рисунок 1). Основные проблемы исходной ступени - это потери в осевом зазоре вследствие вихревой структуры потока, перетечки через радиальный зазор, неравномерность потока по высоте проточной части, а также низкий запас газодинамической устойчивости.

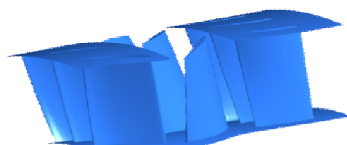
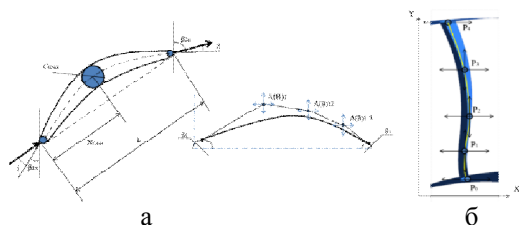


Рис. 1. Трехмерная модель первой ступени ОК GTK-10-4

Профилирование лопаток включает в себя возможность получения трехмерной формы лопатки за счет соединения плоских профилей, построенных по заданным геометрическим параметрам (Рисунок 2А). Схема формирования осевого навала лопаток выполнено в специальном программном коде (Рисунок 2Б). В данной работе не производилась оптимизация формы плоских профилей, а было принята форма аэродинамического стандартного распределения толщины *NACA 65* [5].



$V_{1л}$  - входной лопаточный угол,  $V_{2л}$  - выходной лопаточный угол,  $i$  - угол атаки,  $\delta$  - угол отставания,  $b$  - хорда,  $S_{max}$  - максимальная толщина,  $X_{Cmax}$  - положение максимальной толщины,  $R_{1,2}$  - радиусы входной и выходной окружности,  $A_i$  - управляющие точки спинки,  $B_i$  - управляющие точки корыта,  $P_i$  - управляющие точки средней линии.

Рис. 2. Параметризация плоского профиля (а) и средней линии лопатки (б)

Данная ступень имеет коэффициент нагрузки  $\psi$  в корневой части от 0.6 до 0.65, что соответствует углу поворота потока в НА порядка 33-38 градусов.

Исследования течения в ступени осуществлялись в программном комплексе вычислительной газодинамики. По известным геометрическим данным построены профили лопаток, а также меридиональные обводы.

Разбиение на конечные элементы осуществлялось в сеточном генераторе. Количество ячеек для каждого расчетного домена приведено в таблице 1. В качестве модели турбулентности принята высокорейнольдсовая двухпараметрическая модель  $k-\omega$ . Параметр  $y^+$  находился в пределах от 15 до 150. Сходимость расчета достигала величины невязок  $10^{-5}$  в среднем за 200 итераций. Граничными условиями для расчета в CFX

являлись полное давление  $P_{1т}$  и полная температура  $T_{1т}$  на входе, а также статическое давление на выходе  $P_{2ст}$  в диапазоне изменения от 99.5 кПа и до 115 кПа. На границах доменов использовался метод осреднения «stage».

Таблица 1

Домен	Количество ячеек
ВНА	250 000
РК	300 000
НА	400 000

Анализ результатов исследования исходного варианта ОК показал наличие отрывных зон в корневой части НА. В результате срыва потока в корневой части замечено отклонение потока от расчетных значений, в связи с чем, происходит увеличение угла отставания на выходе из решетки. Это отставание вызвано нерасчетным углом входа потока в направляющий аппарат. Распределение числа Маха для исходного варианта представлено на рисунке 3.

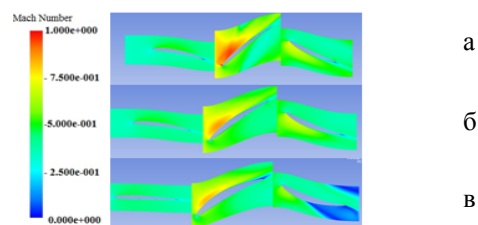


Рис. 3. Распределение числа Маха для исходного варианта а- периферийное сечение, б-среднее сечение, в- корневое сечение

Для исходной ступени запас ГДУ составляет 12%, что является недостаточным для первой ступени ОК из-за ее нагрузки на переменных режимах. Для нормальной, устойчивой работы ступени на изодроме  $n=1$  запас ГДУ должен быть от 15 до 20%. Политропный КПД исходной ступени в номинальной точке составляет 0,908.

На основании исследования исходной ступени, было принято решение о усовершенствовании конструкции лопаточного аппарата с помощью осевого навала для повышения эффективного КПД, снижения интенсивности вихря и срыва потока в корневом сечении.

Для исследования были выбраны 3 формы навала лопатки с прогибом в середине профильной части, в корне и на периферии. Форма лопатки с прогибом в средней части получена путем изменения центра масс лопатки по кривой Безье второго порядка (Рисунок 4а). Для получения «косого» навала в осевом направлении с максимальным смещением корневого сечения или периферийного использована линейная интерполяция положения центра масс плоских сечений (Рисунок 4 б, в).



Рис. 4. Схема осевого навала лопаток: а – изгиб в среднем сечении; б – изгиб в периферийном сечении; в – изгиб в корневом сечении.

Представленные выше схемы навала дают возможность оценить влияние формы лопатки на структуру потока, в диапазоне максимального смещения положения центра масс от 0% до  $\pm 15\%$  от высот лопатки с шагом 2.5% для различных схем навала. Диапазон изменения формы лопатки выбран исходя из технологических соображений изготовления и необходимости обеспечить максимальный КПД, а также запас ГДУ от внесенных изменений во время исследования.

Во время исследования навала на рабочем колесе, полученные варианты расчетов не дали положительного эффекта с точки зрения повышения запаса ГДУ и увеличения КПД при смещении оси лопатки в сторону выхода потока «+dx». Так же при навале в сторону всаса «-dx» не замечено увеличения ни в КПД, ни в запасе ГДУ.

Из распределения числа Маха в сечениях РК в сторону всаса по трем сечениям получили, что в корневой части нет заметного уменьшения срывных зон, и это связано с неравномерностью статического давления по высоте канала, из-за чего увеличивается динамический напор в средней и периферийной части, и как следствие это влечет за собой перераспределение расхода преимущественно в периферийную зону и снижение плотности потока в корневой части. Исследуя течения потока в РК в сторону выхода на трех сечениях показало, что с применением навал в корневой части от -2.5% до -3% снижается зона срыва потока в корне НА до 20% (Рисунок 5). Это связано с тем, что неравномерность статического давления по высоте канала за РК снижается и увеличивается зона осреднения потока между линиями тока (Рисунок 6).

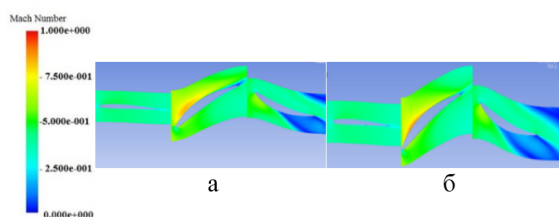


Рис. 5. Распределение числа Маха РК: А – исходный вариант; Б – навал в корневой части на -2.5%

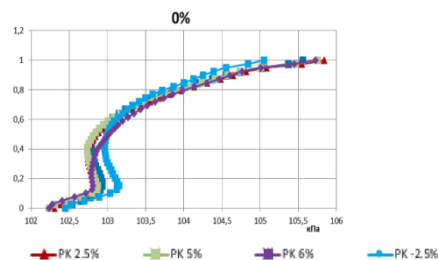


Рис. 6. Распределение статического давления по высоте канала за РК в корневом сечении

Навал РК в сторону всаса на 0% высоты лопатки позволил снизить угол отставания в корневой части НА за счет перестроения треугольника скоростей с помощью увеличения расходящей составляющей абсолютной скорости. Влияния на углы потока в рабочем колесе не замечено при использовании всех навалов пера лопаток (Рисунок 7).

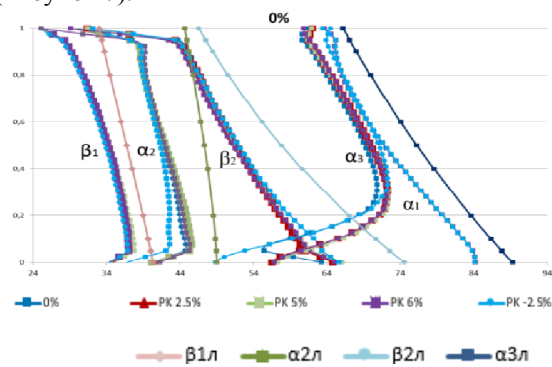


Рис. 7. Распределение углов по высоте РК

Исследование осевого навала НА для трех сечений в сторону всаса показало, что навал на 50% высоты лопатки со смещением положением центра масс от 7.5% до 10% относительно исходного варианта, повышает КПД ступени на 1.5% в рабочей точке и увеличивает КПД на концах изодромы на 1.1% у границы помпажа и на 0.9% у границы запираания (Рисунок 8), а при изменении формы лопатки в корне и на периферии в ту же сторону заметных улучшений в структуре потока и в интегральных характеристиках не получено.

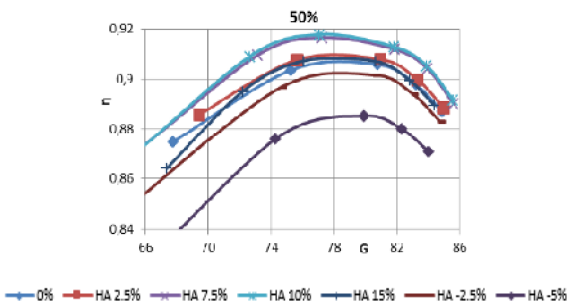


Рис. 8. Характеристики компрессора КПД-Г НА

Запас газодинамической устойчивости ступени при изменении формы лопатки на среднем



сечении в сторону выхода от 7.5% до 10% дает увеличение коэффициента запаса устойчивости на 2,3%, а навал на 0% высоты лопатки от 7.5% до 10% повышает  $\Delta K_u$  на 1,9% (Рисунок 9). Это связано с тем, что его применение позволило равномерно распределить поток по высоте, а, следовательно, увеличить расход воздуха вблизи меридиональных обводов, что положительно сказалось на обтекании профилей лопаток данных зон. Навалы НА в сторону всаса на трех сечениях не дал заметных изменений в обтекании лопаток и его применение не целесообразно.

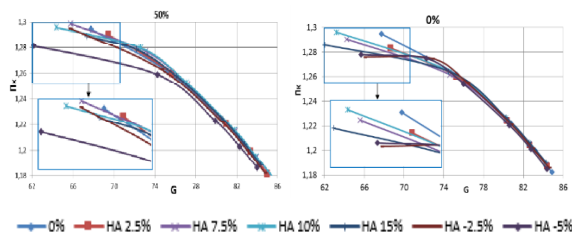


Рис. 9. Характеристика компрессора Пк – G НА

Из распределения числа Маха при навале НА в сторону «+dx» на трех сечениях показало, что навал на 50% высоты лопатки со смещением положением центра масс от 2.5% до 15% снижает срыв потока в корневой зоне. Это связано с равномерностью распределения потока по высоте проточной части и зоной осреднения за рабочим колесом. При навале в сторону всаса происходит ухудшение интегральных характеристик и увеличение плотности в периферийной зоне. При положительном навале от 7.5% до 15% наблюдается тенденция к выравниванию статического давления по высоте (Рисунок 11). Это связано с перемешиванием потока в зоне осевого зазора и снижением скорости в периферийной части и ее увеличением в корневой. Навал на 100% высоты лопатки со смещением положением центра масс от 2.5% до 15%, а также на 0% высоты лопатки со смещением положением центра масс от -2.5% до -5% также снижает срыв потока в корневом сечении. Наилучшее обтекание профиля относительно исходного представлено на рисунке 10.

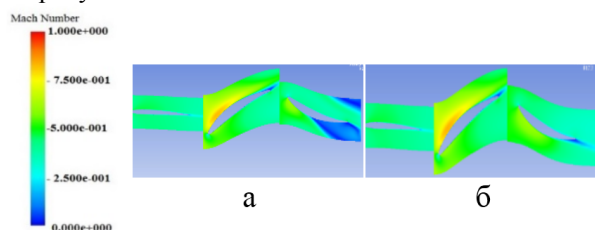


Рис. 10. Распределение числа Маха НА:  
а - исходный вариант; б - навал в средней части на 10%

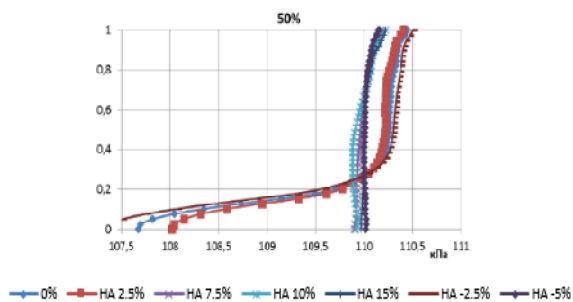


Рис. 11. Распределение статического давления по высоте канала на 50% высоты лопатки

Увеличение осевого зазора между РК и НА позволяет не только сделать параметры по высоте равномерными, но и снизить угол отставания за НА. Навал НА в сторону «-dx» на 50% высоты лопатки показал, что угол  $\alpha_2$  относительно исходного варианта снизился, а, следовательно, угол атаки увеличился в корытце, что вызывает в свою очередь срыв потока со спинки и снижение статического давления в корне. При положительном навале картина распределения углов меняется с точностью до наоборот (Рисунок 11). Как и при изгибе лопатки на 50% так и при изгибе в корне и периферии в отрицательную сторону картина распределения углов повторяется и с увеличением осевого зазора между рабочей и направляющей лопаткой повышается осреднение потока, что благоприятно сказывается на снижении радиальных перетечек.

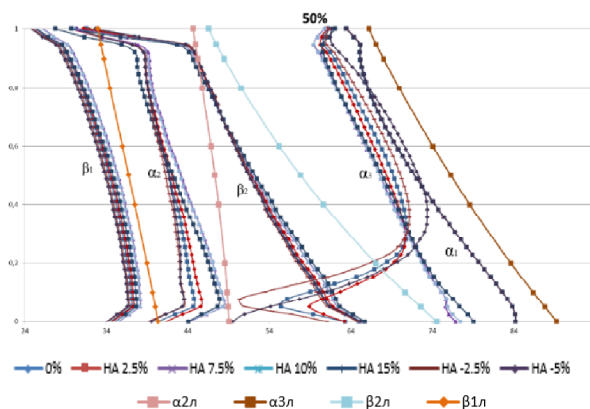


Рис. 11. Распределение углов по высоте НА

Анализируя полученные данные можно сделать следующие выводы:

1. Навалы РК с точки зрения повышения КПД и запаса ГДУ применять не целесообразно из-за отсутствия заметного снижения срыва потока в НА и незначительного влияния на равномерность параметров по радиусу ступени. Запас ГДУ при изменении формы лопатки на средней части лопатки в сторону «+dx» снижается на 0.5% - 0,9%, а навал в сторону «-dx» снижает запас ГДУ на 0.4% относительно исходного варианта. КПД в

рабочей точке при изгибе лопатки на 50% высоты профильной части в сторону «+dx» снижает на 0.6% и в сторону «-dx» на 1.2%. Изгиб лопатки в корневом сечении в сторону «+dx» снижает КПД на 0.3% и в сторону «-dx» на 1.1%, а навал же в периферийном сечении в сторону «+dx» снижает КПД на 0.6% и в сторону «-dx» на 1.3%.

2. Осовой навал НА на 50% высоты лопатки является более эффективным с точки зрения повышения КПД и запаса ГДУ. Навал лопатки со смещением положением центра масс от 7.5% до 10% относительно исходного варианта, повышает КПД ступени на 1.5 % в рабочей точке и увеличивает КПД на концах изодромы на 1.1 % у границы помпажа и на 0.9% у границы запираания. Запас газодинамической устойчивости ступени при изменении формы лопатки на среднем сечении от 7.5% до 10% дает увеличение запаса устойчивости на 2,3%. Это обусловлено тем, что применение навала позволило равномерно распределить поток по высоте и снизить срыв потока в корне на 30% относительно исходного, следовательно, увеличился расход воздуха вблизи меридиональных обводов, что положительно сказалось на обтекании профилей лопаток из-за поджатия потока к корневой зоне лопаток. Запас ГДУ на 0% высоты лопатки от 7.5% до 10% повышается на 1,9%, а навал в периферийном сечении снижает запас ГДУ на 1,1%. КПД ступени в корневом сечении рабочей точки снижается до 0,8%, в периферийном сечении на 0,5%. Навалы НА в сторону «-dx» на трех применение не целесообразно.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Блинов В. Л. Выбор параметров расчетной модели при решении задач многокритериальной оптимизации плоских компрессорных решеток / В. Л. Блинов, Ю. М. Бродов, В. А. Седунин, О. В. Комаров // Компрессорная техника и пневматика. 2015. № 1. С. 36–42.
2. Расчетное исследование влияния тангенциального наклона и косоугольного обтекания лопаток направляющего аппарата на работу ступени осевого компрессора Архипов Д.В, Тумашев Р.З. Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 11. С. 178–192.
3. Optimization approach and some results for 2D compressor airfoil./ Komarov, Oleg V.; Sedunin, Viacheslav A.; Blinov, Vitaly L.; Serkov, Sergey A. In: International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems, Vol. 8, No. 3, 01.12.2016, p.39-46.
4. Влияние сложного навала рабочих и направляющих лопаток ЦВД паровой турбины на аэродинамические характеристики проточной части А.В Русанов, Ю.П Волков // Энергетическое машиностроение 2008 С. 93-97
5. J.C. Emery, L.J. Herrig, J.R. Erwin, A.R. Felix. Systematic two-dimensional cascade test of NACA 65-series compressor blades at low speeds. NACA Report 1368, 1958.